

J. JEZEQUEL
Ingénieur E.N.S.M.
Assistant

H. LEMASSON
Diplômé d'Etudes Supérieures
Techniques de l'Université
de Rennes
Assistant

J. TOUZE
Technicien
Groupe de Mécanique des Sols
Laboratoire Régional de
Saint-Brieuc

le pressiomètre Louis Ménard

quelques problèmes de mise en œuvre et leur influence sur les valeurs pressiométriques

PRESENTATION

F. SCHLOSSER
Ingénieur des Ponts et Chaussées
Chef de la Section
de Mécanique des Sols
Laboratoire Central

Comme nous l'avons rappelé dans le précédent numéro du Bulletin, l'un des objectifs du Groupe d'Etude des Essais de Sols en Place (GEESP) est d'établir des modes opératoires et des recommandations couvrant chaque type d'essai en place.

Les essais in-situ, en particulier l'essai pressiométrique, semblent des essais faciles. Cet argument est bien souvent employé par certains ingénieurs qui voudraient réduire la Mécanique des Sols aux seuls essais in-situ et qui commettent par là deux erreurs :

1° Il n'est pas possible de dissocier et surtout d'opposer les essais de Mécanique des Sols in-situ et ceux en laboratoire. Chaque essai a en effet ses avantages, ses inconvénients, un domaine préférentiel d'utilisation, tant en ce qui concerne les types de sols que les problèmes à résoudre. Il faut se rappeler qu'aucun essai, quel qu'il soit, ne peut apporter tous les éléments nécessaires à la résolution de l'ensemble des problèmes de la Mécanique des Sols !

Au contraire, essais en laboratoires et essais in-situ correctement exécutés, judicieusement utilisés, permettent d'obtenir les informations et les recoupements nécessaires à toute connaissance sûre et complète des sols, en vue de résoudre un problème déterminé. Bien souvent ces deux types d'essais se complètent l'un l'autre.

2° Les essais in-situ sont des essais délicats par lesquels il faut effectuer une mise en œuvre particulièrement soignée. La facilité n'est qu'apparente.

Bien sûr il est toujours possible d'exécuter ces essais sans précautions, mais les résultats obtenus sont aussi critiquables que ceux obtenus en laboratoire, effectués à la hâte sur des échantillons en grande partie remaniés.

L'article de MM. Jezequel, Lemasson et Touzé ne traite que du deuxième point ; il concerne la mise en œuvre du pressiomètre. Il ne s'agit pas là d'un mode opératoire complet, mais ce document servira de base pour le mode opératoire qui sera prochainement élaboré par le Groupe d'Etudes des Essais de Sols en Place (CEESEP).

Les problèmes de mise en œuvre exposés dans cet article sont le fruit d'une expérience longue et importante concernant l'utilisation du pressiomètre. Ils doivent être considérés dans nos laboratoires des Ponts et Chaussées comme une connaissance préalable indispensable à toute bonne utilisation du pressiomètre.



Sondage à la tarière à main
avec injection de bentonite.



Le pressiomètre Louis Ménard.

RESUME A L'INTENTION DES PRATICIENS

Les essais de mécanique des sols réalisés en place connaissent en France un développement important. Sans nier l'intérêt théorique de certains appareils, on peut penser que c'est surtout l'aspect pratique qui a favorisé au début cette nouvelle branche de la mécanique des sols.

On connaît les difficultés de prélèvement, de conditionnement et de transport des sols pour essais de laboratoire.

L'essai en place semble ne pas présenter ces difficultés.

C'est ce qu'on a voulu examiner ici à propos d'un essai important : l'essai pressiométrique Louis Menard.

L'essai pressiométrique consiste à gonfler dans le sol une sonde cylindrique placée au préalable dans un forage.

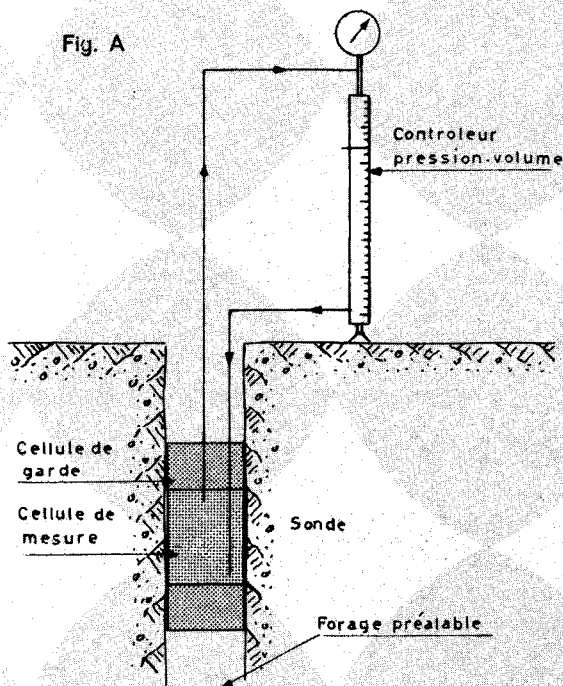
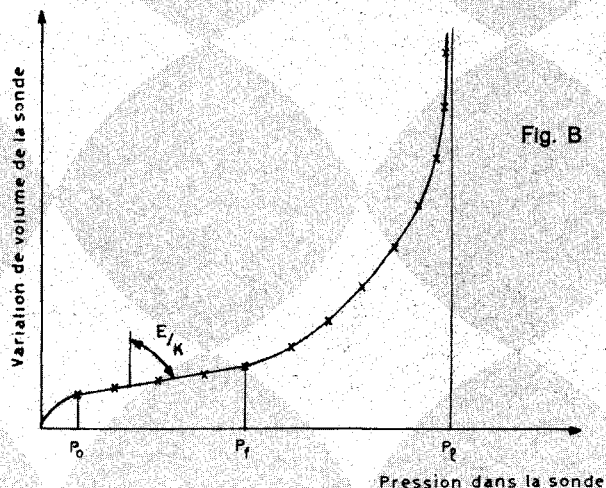
L'appareillage comporte trois parties (*fig. A*) :

— la sonde (sa technologie peut varier suivant

les modèles). Elle comporte 3 cellules. La déformation du sol est supposée plane au droit de la cellule centrale ;

— le contrôleur pression-volume qui, comme son nom l'indique, permet d'exercer les pressions dans la sonde et de mesurer sa variation correspondante de volume ;

— les fils de connexion qui permettent de relier les deux parties précédentes.



L'essai se pratique en 10 paliers de pression maintenus chacun une minute.

La courbe de la *figure B* représente le volume de la cellule centrale au bout d'une minute en fonction de la pression correspondante.

Moyennant certaines corrections on peut définir les valeurs suivantes :

● Pression limite

Pression asymptotique généralement enregistrée lorsque le volume de la sonde est approximativement double du volume initial.

● Pression de fluage

Pression à partir de laquelle les déformations différées de la sonde deviennent importantes par rapport aux déformations instantanées.

● Module pressiométrique

A un coefficient près ce module est égal à l'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe pressiométrique. Cette partie linéaire représente une réaction approximativement élastique du sol sous la sollicitation pressiométrique. L'étude qui suit montre la faible influence de la mise en œuvre sur la pression limite.

Par contre les qualités des parois du forage ont une influence prépondérante sur la valeur du module pressiométrique.

Pour que ce module soit représentatif il faut, pour les sols mous :

- que les parois soient aussi intactes que possible,
- que le forage soit aussi bien calibré que possible,
- que les fluides d'injections ne polluent pas le sol à éprouver.

Dans les sols les plus mous (argiles molles, sables lâches) seule la tarière à main permet de remplir ces conditions en respectant certaines règles.

Dans les sols meubles plus compacts, les forages par rotation mécanique conduisent à des résultats acceptables.

Par contre le battage semble souvent donner des résultats défectueux.

Lorsque les parois de forage ne peuvent se tenir ni naturellement ni à l'aide de boues d'injection, le battage direct du pressiomètre sans avant-trou est nécessaire.

L'appareil est placé alors à l'intérieur d'un tube métallique portant des fentes longitudinales qui lui permettent de se dilater sous l'action de la sonde.

Les caractéristiques pressiométriques obtenues par cette méthode diffèrent de celles obtenues à partir d'avant-trou.

Cette technique doit donc être réservée aux sables et graviers bouillants pour lesquels il n'est pas possible de procéder d'une autre manière.

J. J.

L'essai pressiométrique est un essai en place qui se pratique généralement dans un forage (fig. 1).

Cela présente quelques difficultés et inconvénients que nous allons examiner au cours de cet article. Mais ceci permet en contre-partie de relever le niveau de la nappe et de reconnaître les terrains traversés, ces données étant d'ailleurs indispensables à la bonne exploitation de l'essai. Cette reconnaissance est cependant sommaire, car elle se pratique sur des échantillons généralement remaniés,

et de plus le diamètre du forage n'excède pas six centimètres. La qualité de l'information ainsi obtenue est d'ailleurs étroitement liée à la nature du sondage pratiqué et dans certains cas particuliers, il paraît très souhaitable de contrôler les coupes de terrains ainsi obtenues par un ou plusieurs forages de plus gros diamètre.

Le but de notre propos n'est pas d'explicitier la signification physique des caractéristiques pressiométriques mais de traiter de la seule influence de la réalisation de l'essai et des préparatifs nécessaires sur les valeurs pressiométriques considérées intrinsèquement.

On n'en perdra pas de vue que le caractère particulièrement évolutif de la technologie du pressiomètre fait que certaines remarques ou problèmes soulevés ici sont susceptibles de trouver dans l'avenir des solutions satisfaisantes, notamment en ce qui concerne les gaines et membranes, la conception d'ensemble des sondes, ou le principe même de l'essai.

I. RAPPELS SOMMAIRES CONCERNANT L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

I.1 UN PRESSIOMETRE COMPORTE TROIS PARTIES :

- le contrôleur pression-volume (C.P.V.) placé à la surface du sol ;
- la sonde pressiométrique placée dans le forage ;
- les tubulures de connexion (fil de Rilsan) permettant le passage des fluides (eau et gaz).

Actuellement deux types d'appareils sont essentiellement utilisés :

- le pressiomètre « E », qui est l'appareil classique, autorisant des pressions de l'ordre de 25 à 30 bars et dont les sondes comportent trois cellules distinctes (une cellule centrale de mesure et deux cellules de garde) ;

- le pressiomètre « G », qui tendrait à remplacer tous les autres appareils (y compris le « E ») et qui comporte de nombreuses modifications. Notons les plus importantes :

- le C.P.V. et la disposition spéciale des tubulures (tubes Rilsan coaxiaux, le conduit d'eau étant placé à l'intérieur du conduit d'air) permettent des pressions pouvant atteindre 100 bars.

- les sondes sont modifiées comme indiqué à la figure 2. Dans certains modèles l'âme de la sonde est creuse, ce qui permet la remontée des sédi-

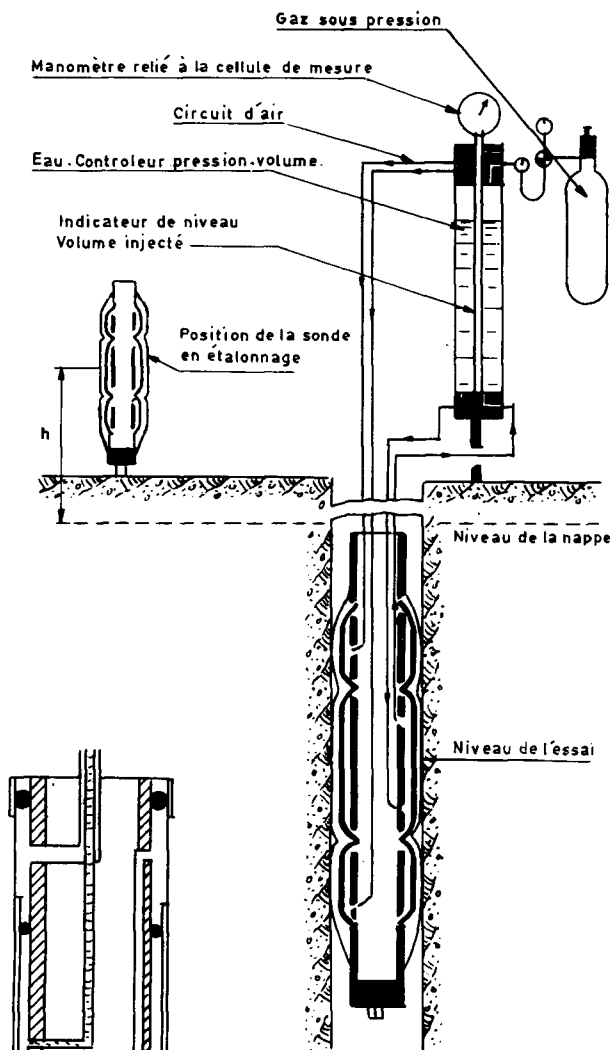


Fig. 1 - Sonde Pressiométrique et contrôleur pression-volume type « E ».

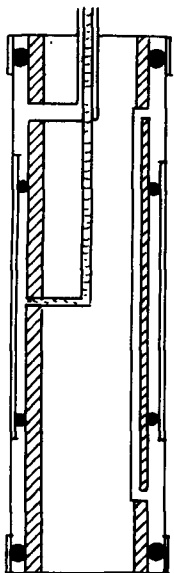


Fig. 2 - Sonde pressiométrique type « G ».

ments. Elle ne comporte que deux membranes : celle de la cellule de mesure et une membrane (ou gaine) recouvrant l'ensemble et formant ainsi les deux cellules de garde.

Au cours de l'exposé, nous serons donc amenés à différencier parfois les deux types de matériels.

1.2 L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE STANDARD

Dans sa conception actuelle, il s'agit d'un essai à contraintes contrôlées.

Il se pratique en dix paliers de pression, croissant en progression arithmétique jusqu'à la butée limite. Chaque palier est maintenu durant une minute. On note les variations de volume correspondantes de la sonde au bout de quinze secondes, trente secondes et une minute. L'essai complet dure de dix à quinze minutes.

Dans certains sols intermédiaires et très généralement dans les sables lâches saturés, il est recommandé de pratiquer deux types d'essais :

- l'essai standard défini plus haut,
- et quelques essais avec des paliers plus longs (de l'ordre de quatre à cinq minutes) afin de laisser, dans une certaine mesure, se dissiper la pression interstitielle.

Dans le rocher par contre (modules supérieurs à 1 000 bars), on pourra réduire la durée des paliers.

1.3 COURBES ET VALEURS PRESSIOMETRIQUES

De l'essai classique, on peut déduire deux courbes :

- la courbe pressiométrique, (fig. 3) qui représente les volumes de la sonde en fin de palier en fonction de la pression correspondante ;

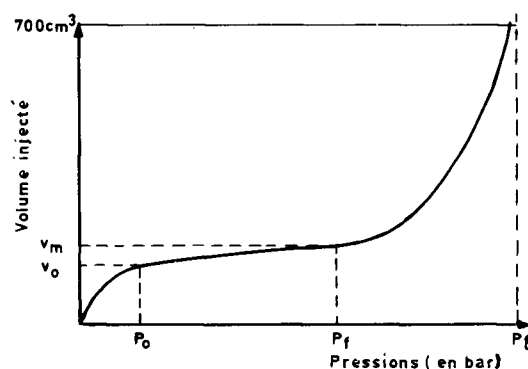


Fig. 3 - Courbe pressiométrique pression-volume.

- la « courbe de fluage » (fig. 4) qui représente la variation de volume de la sonde entre quinze secondes et une minute pour chaque palier de pression, traduit une vitesse de déformation en fonction de la contrainte appliquée.

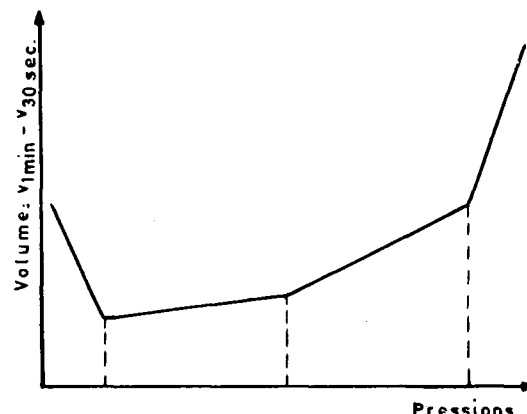


Fig. 4 - Courbe donnant la variation de volume de la sonde, par paliers de pression, entre trente secondes et une minute (dite « courbe de fluage »).

Ces courbes permettent de définir les valeurs suivantes :

1.3.1 La pression horizontale des terres au repos : P_0h

Nous ne reviendrons pas au cours de cet exposé sur la mesure de P_0h à partir de l'essai standard. Nous pensons en effet que — mis à part dans certains sables forés à la tarière à main — il n'est pas possible de mesurer ainsi P_0h avec une précision suffisante, et ceci pour trois raisons :

- on dispose en début d'essais d'un nombre de points de mesure insuffisants pour tracer une courbe précise ;
- il s'agit d'une mesure intéressant véritablement la paroi du forage. Elle est donc très influencée par l'état de cette paroi ;
- si le volume du forage dépasse de beaucoup le volume au repos de la sonde, l'inertie des gaines et membranes peut avoir une grande importance devant les faibles valeurs à mesurer.

1.3.2 Le module pressiométrique « E »

Le module pressiométrique est défini de façon conventionnelle. Le schéma de base ayant servi à son élaboration est la théorie de l'élasticité (en particulier la théorie de Lamé des cylindres épais) dans l'hypothèse d'une déformation plane.

On a d'autre part adopté une définition volumé-

trique de ce module, ce qui est plus simple puisqu'on enregistre des variations de volume.

$$E = k \frac{dp}{dv}$$

dp/dv est l'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe.

k un coefficient caractéristique de l'appareil.

$$k = 2 (1 + \sigma) (v'_0 + v'_m) \text{ où}$$

σ est le coefficient de Poisson du sol,

v'_0 le volume de la sonde à vide et

v'_m le volume total moyen de la sonde au cours de la phase pseudo-élastique.

Pour que les résultats soient comparables entre eux il faut donc que toutes les sondes aient le même v'_0 soit 594 cm³.

Ainsi, la cellule de mesure des sondes \varnothing 60 mm aura 21 cm de longueur, celle des sondes \varnothing 44 mm, 37 cm de longueur.

Le module E est encore appelé module pressiométrique vierge ou module pressiométrique de premier chargement.

I.3.3 La pression de fluage P_f

C'est la limite supérieure de la phase pseudo-élastique, ou la pression pour laquelle les déformations différées de la sonde deviennent importantes par rapport aux déformations immédiates.

Elle s'évalue, soit à partir de la courbe standard, soit mieux à partir de la courbe de fluage.

I.3.4 La pression limite P_l

C'est la résistance du sol en butée latérale cylindrique. Par définition, c'est la pression qui, pour la vitesse standard d'essai, entraîne un accroissement de volume ΔV de la sonde égal au moins au volume V_0 initial de la cavité à P_0 , soit $\Delta V/V_0 = 1$. Très généralement, la pression limite se lit directement sur la courbe en prenant l'abscisse de son asymptote.

Du point de vue essai, on doit noter une différence fondamentale entre le module mesuré pour des $\Delta V/V_0$ de l'ordre de 0,3, c'est-à-dire essais « à la surface du forage », et la pression limite qui intéresse un volume de sol plus grand.

Certes, tout au long de l'essai on mesure la réaction du premier « anneau » de terrain à la sollicitation de la sonde, mais cette réaction n'est pas indépendante de l'état des « anneaux » suivants. Cela pourra expliquer par la suite certaines propriétés différentes de ces deux valeurs, eu égard à la mise en œuvre de l'appareil.

I.4 AUTRES POSSIBILITES DES ESSAIS PRESSIOMETRIQUES

I.4.1 Une fois la pression limite atteinte, il peut être utile de noter la courbe de déchargement. On procède par paliers d'amplitude, par exemple doubles de ceux du chargement.

I.4.2 On peut également pratiquer des essais dits « alternés » (fig. 5). Pour cela, on monte en pression par paliers comme pour un essai normal. A une pression P_1 inférieure à P_l , on procède à un déchargement jusqu'à une pression P_2 supérieure à P_0 . On réalise ensuite des cycles chargements déchargements entre ces deux pressions P_1 et P_2 .

Si les propriétés du sol sont réversibles, les courbes se superposent; elle ne le sont pas si les courbes sont décalées. Elles tendent cependant rapidement à se chevaucher au bout de plusieurs cycles.

Le module correspondant est appelé module alterné E^+ .

I.4.3 La mesure des pressions interstitielles au bord de la sonde est également possible. On reviendra ultérieurement sur ces essais qui sortent du cadre des essais courants.

I.5 CORRECTIONS DIVERSES

Les valeurs enregistrées sont des valeurs « brutes » qui doivent être corrigées pour tenir compte de l'inertie des sondes, des variations de volume de l'appareillage et de la hauteur piézométrique.

I.5.1 Corrections d'inertie *

Des pressions lues sur le manomètre, il faut déduire l'inertie de la sonde (membranes, gaines et éventuellement tube lanterné). Cette inertie se mesure par étalonnage de la sonde hors du forage (sonde placée verticalement auprès du C.P.V.). L'étalonnage doit se faire avant les essais. Le choix de l'habillage des sondes doit être fonction des qualités de terrain à éprouver et dans les sols médiocres il n'est pas recommandé d'utiliser des membranes de forte inertie. Cela peut cependant être nécessaire dans le cas de sols mous avec blocs anguleux ou coquillages (risques d'éclatement). Pour l'exploitation de l'essai, le tracé de la courbe corrigée est alors souhaitable car il permet de mieux mettre en évidence les diverses phases de l'essai.

* On utilise le mot « inertie » par tradition bien que ce vocable soit probablement mal adapté au phénomène. Le GESEEP essaiera de proposer un autre terme.

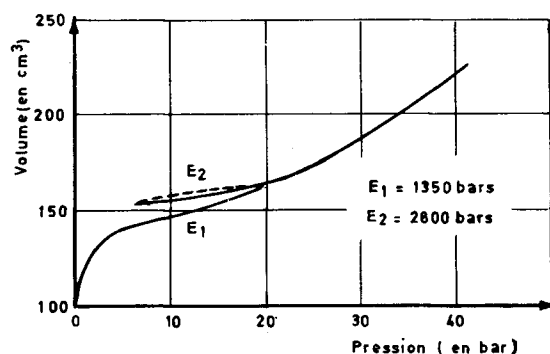


Fig. 5 - Essai pressiométrique alterné - Schiste altéré (Brest).

Pour certaines membranes, il est indispensable de procéder à plusieurs cycles de gonflement en cours d'étalonnage car leur inertie peut être assez variable. Généralement la réponse de la sonde demeure constante au bout de quatre à cinq cycles (fig. 6). Une autre méthode consiste à laisser les sondes gonflées pendant plusieurs heures avant les essais.

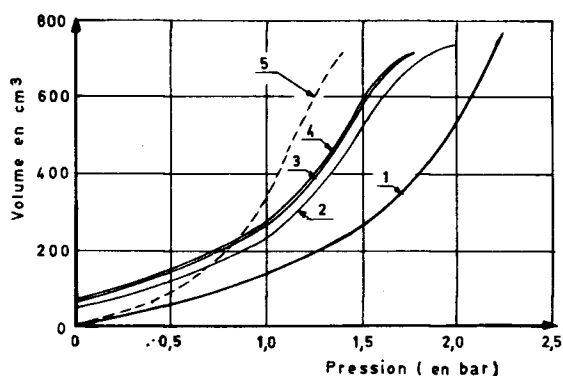


Fig. 6 - Etalonnage de membrane. Sonde E Ø 60.
étalonnages 1 à 4 : cycles successifs de gonflement.
étalonnages 5 : sonde vierge gonflée directement à 700 cm³ pendant 16 heures.

Dans les terrains les plus médiocres, il est indispensable de procéder à un nouvel étalonnage une fois terminée la campagne d'essais, afin de vérifier si l'inertie n'a pas varié.

Les sondes de type « G » présentent dans les sols mous l'inconvénient par rapport au type « E » d'avoir une inertie double puisqu'elles nécessitent toujours deux épaisseurs de membrane alors qu'une seule peut suffire pour le type « E ». Cela est une gêne pour les essais en terrains très médiocres (argiles molles, vases et tourbes) puisque l'inertie minimale en « G » est de l'ordre de 0,6 à 1 bar pour une déformation de 700 cm³.

Dans l'état actuel des choses, la question d'inertie des sondes milite donc en faveur de l'utilisation des sondes « E » dans ces terrains.

1.5.2 Correction de dilatation des tubulures du contrôleur Pression-Volume C.P.V.

Pour les appareils de type « E », les tubulures de Rilsan qui conduisent l'eau du C.P.V. à la sonde peuvent se dilater sous l'action de la pression, de sorte que le volume réellement injecté dans la sonde est moindre que celui noté au C.P.V. Cette correction se fait par étalonnage direct.

Pour des pressions ne dépassant pas 25 bars, la compressibilité de l'eau, la variation de volume du C.P.V. et des gaines sont négligeables par rapport à la compressibilité du sol. Cela n'est plus vrai pour les hautes pressions. Ces diverses compressibilités sont étalonnées directement en plaçant les sondes sous pression dans des tubes indéformables.

Pour la dilatation des Rilsan on peut admettre en moyenne les valeurs suivantes :

$a = 1 \text{ cm}^3$ par bar pour 15 mètres de fils 4-6

$a = 0,6 \text{ cm}^3$ par bar pour 15 mètres de fils 3-6

Pour les pressiomètres « G », en raison de la disposition coaxiale des tubulures eau-air, cette correction devient négligeable en-deçà de 25 bars. Au-delà de 25 bars, la compression du tube intérieur ne peut être négligée mais elle est intégrée dans l'étalonnage exposé plus haut.

Ces phénomènes sont étroitement liés aux variations de température et, sur chantier, il faut prendre toutes précautions pour que la température ne varie pas de façon exagérée entre l'étalonnage et les essais. Un appareil laissé en plein soleil pendant l'arrêt de travail de la mi-journée peut atteindre des températures supérieures à 40°. Les coefficients a s'en trouvent changés de façon importante (fig. 7).

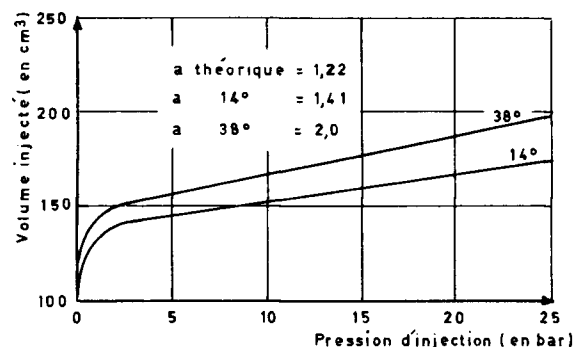


Fig. 7 - Etalonnage des fils de Rilsan 4-6.
Jeu de fils de 18,30 m.

Ainsi, pour un jeu de quinze mètres de fils 4-6, nous avons mesuré $a = 1,15 \text{ cm}^3$ par bar à 17°C. Cette valeur est passée à 1,64 cm³ pour 38°C. Pour l'essai correspondant (granite altéré), le module passait de 950 bars pour la valeur $a = 1$ jusqu'à 1 010 bars pour $a = 1,15$ et 1 300 bars pour la correction vraie de $a = 1,64$.

Cette correction n'est importante que pour des roches et non pour des sols qui présentent toujours une compressibilité importante par rapport aux phénomènes précédents.

1.5.3 Correction de hauteur piézométrique

Les pressions sur le circuit d'eau sont lues en surface. Les pressions dans la sonde sont différentes d'une valeur qui est égale au poids de la colonne d'eau située dans les tubulures entre la sonde et le C.P.V.

Lorsque l'essai est effectué sous la nappe (fig. 8), Ménard a adopté, par définition, la règle suivante :

$$P_{\text{Ménard}} = P_{\text{lue}} + (h_1 - h_2) \gamma_w$$

P_{lue} : pression lue au manomètre.

h_1 : différence de cote entre le manomètre et le milieu de la sonde

h_2 : différence de cote entre le niveau de la nappe et le milieu de la sonde.

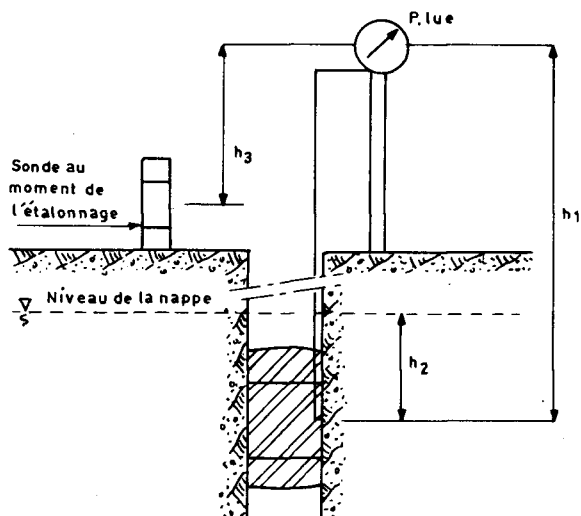


Fig. 8 - Correction de hauteur piézométrique.

Pourtant la pression réelle dans la sonde est bien :

$$P_{\text{réelle}} = P_{\text{lue}} + h_1 \gamma_w$$

qui est donc la pression totale réelle dans le premier « anneau » de sol, au bord de la sonde.

Nous pensons que la pression définie par Ménard peut prêter à confusion : c'est une pression effective dans la mesure où l'essai pressiométrique est drainé ce qui n'est le cas que dans les sables propres pour la vitesse standard de mise en charge.

La même correction hydrostatique doit être prise en compte pour l'étalonnage

$$I_{\text{réelle}} = I_{\text{lue}} + h_3 \gamma_w$$

D'où :

$$P_{\text{Ménard}} = P_{\text{lue}} + [h_1 - (h_2 + h_3)] \gamma_w - I_{\text{lue}}$$

$$P_{\text{totale}} = P_{\text{lue}} + (h_1 - h_3) \gamma_w - I_{\text{lue}}$$

Pour une facilité de lecture sur chantier on pose :

$$h_z = h_1 - h_3$$

Doù :

$$P_{\text{Ménard}} = P_{\text{lue}} + (h_z - h_2) \gamma_w - I_{\text{lue}}$$

Ces problèmes de correction sont à examiner avec le plus grand soin surtout dans certains cas particuliers où des valeurs de h peuvent être négatives.

1.5.4 Manomètres

Les manomètres servant à la mesure de la pression dans le circuit d'eau sont des manomètres Blondel à lame d'acier. Inutile d'insister sur le soin qu'il faut apporter au contrôle et à l'étalonnage de ces appareils. Le laboratoire de Saint-Brieuc utilise pour ce faire une balance manométrique Desgranges et Huot (type 3010).

Les manomètres sont vérifiés à intervalles réguliers. Nous avons admis une tolérance de $\pm 5 \%$. Au-delà, les manomètres sont rebutés. On constate que leur vieillissement se traduit généralement par une indication plus faible que la pression vraie. Nous n'avons pas constaté de variations sensibles d'indication des manomètres en fonction de la température. Il faut cependant éviter le gel des manomètres qui semble parfois faire rétracter les lames d'acier et les détériorer.

1.5.5 Autres remarques

a) Pour les sondes « G » on doit veiller à bloquer de façon toujours identique les bagues coniques de serrage de la cellule de mesure. Elles doivent être distantes de 20,5 cm afin que la sonde de mesure ait un volume équivalent à celui des sondes « E » de même diamètre.

b) Nous n'avons pas insisté sur les problèmes posés par les essais à haute pression. Notons qu'il existe plusieurs types de sondes : la sonde de 60 (BX standard) qui mesurerait d'après le constructeur, des modules jusqu'à 250 000 bars, la sonde 60 spéciale (400 000 bars), la sonde 70 (NX) (250 000 bars) et la sonde de 80 qui atteindrait des modules bien supérieurs.

c) La technologie des sondes « G » impose certaines sujétions.

Dans les sondes « E » on donne aux cellules de garde une avance de 0,1 bar par mètre de profondeur afin de corriger les effets de la pression hydrostatique agissant au niveau de la cellule centrale par l'intermédiaire des Rilsan.

Dans les sondes « G », les cellules de garde doivent, au contraire, être en retard par rapport à la cellule de mesure afin que les deux membranes soient bien en contact (et donc que l'essai ne se fasse pas à l'aide des cellules de garde).

Ce retard est assuré automatiquement par un clapet régulateur et la pression dans le circuit d'air est inférieure de 1,5 bar à celle qui agit sur la colonne d'eau dans le C.P.V. Au-delà de dix mètres, la pression hydrostatique assure la différence de pression et le clapet doit être retiré.

Considérons un terrain présentant une pression limite non corrigée de 10 bars. Supposons l'inertie de 0,5 bar pour les cellules de garde et donc de 1 bar pour la cellule de mesure.

A cinq mètres, la pression réelle dans la cellule de mesure est donc de $10 + 0,5 - 1 = 9,5$ bars. Dans la cellule de garde elle est donc de $10 - 1,5 - 0,5 = 8$ bars.

A dix mètres sans clapet, on a donc 10 bars dans la cellule de mesure et 9,5 bars dans les cellules de garde. A vingt mètres, les pressions sont respectivement de 11 et 9,5 bars.

Cette disposition prévue sur les pressiomètres « G » présente l'avantage de l'automatisme, ce qui évite les erreurs importantes de manipulation mais introduit une erreur systématique gênante pour l'esprit car de ce fait la déformée de la sonde « G » n'est probablement pas aussi cylindrique que celle de la sonde « E ». Il nous paraîtrait préférable d'adapter, sur le circuit d'air des pressiomètres « G », des mano-détendeurs permettant de régler la pression à la demande, comme dans les appareils antérieurs.

Dans les terrains de bonne qualité, il est certain que la forme non exactement cylindrique de la sonde n'entraîne guère d'erreur appréciable sur les résultats de la mesure. Dans les terrains les plus médiocres au contraire, il est probable que l'erreur entraînée n'est pas toujours négligeable. On pourrait par exemple fixer la limite de validité des sondes « G » à 10 bars de pression limite. En deçà il serait recommandé d'utiliser les sondes « E ».

d) La disposition coaxiale des tubes de Rilsan entraîne une plus grande difficulté pour la détection des bulles d'air dans le circuit d'eau. En particulier, le nouveau mode opératoire semble recommander la fermeture du robinet de départ d'eau du C.P.V. vers la sonde, lors de l'introduction de l'appareil dans le forage (afin d'éviter le gonflement de la sonde sous l'effet de la pression hydrostatique). Nous pensons que cette pratique peut être dangereuse car l'étanchéité des robinets semble habituellement médiocre (robinets à pointeaux), même si on a pris la précaution de les enduire de graisse au

silicone ce qui devrait d'ailleurs toujours être fait. En particulier, si la nappe est à plus de dix mètres en dessous du C.P.V. le vide se faisant dans le circuit d'eau, la détection des fuites devient alors impossible. Nous pensons que pour les essais qui ne dépassent pas 20 à 25 bars l'utilisation de robinets à boisseau devrait donner une meilleure étanchéité au vide.

II LE DOMAINE D'EMPLOI DU PRESSIOMETRE PEUT-IL ETRE LIMITE PAR DES SUJETIONS INHERENTES A SA MISE EN ŒUVRE ?

Dans ce qui précède, nous avons examiné certaines caractéristiques technologiques qui pourraient avoir une influence sur les résultats de l'essai.

Les qualités de forage mises à part, existe-t-il d'autres problèmes inhérents à la réalisation de l'essai ? (nous étudierons plus loin l'introduction à force de l'appareil).

II.1 VITESSE DE L'ESSAI

Bien que des essais de longue durée — avec mesure de pression interstitielle — aient été réalisés, l'essai classique, objet de cet article, est actuellement orienté uniquement vers des mesures de courte durée. Le mode opératoire actuel ne permet donc de mettre directement en évidence que des phénomènes rapides, tant de compressibilité que de cisaillement.

II.2 EXTRACTION DU MATERIAU DU FORAGE

D'après la théorie de l'élasticité, l'extraction du matériau d'un forage peut produire une plastification des parois de ce forage. Cette plastification pourrait donc enlever tout sens à la mesure du module pressiométrique qui caractérise une réaction pseudo-élastique du sol.

Considérons le cas d'une argile.

Soit k_0 le coefficient de pression des terres au repos. La contrainte tangentielle au bord du forage est

$$\sigma_t = 2 \cdot P_0 h, \text{ soit } \sigma_t = 2 \cdot k_0 \cdot \gamma \cdot Z$$

La limite de la phase pseudo-élastique est approximativement égale à $R_c/2$ (R_c étant la résistance en compression simple).

La condition nécessaire pour que la mesure du module soit représentative est donc :

$$Z = \frac{R_c}{4 k_0 \gamma}$$

En fait ce n'est pas le poids spécifique γ du sol qui intervient seul mais $(\gamma - \alpha)$, α étant le poids spécifique du fluide d'injection ayant servi à la réalisation du forage.

D'après la théorie de l'élasticité, la mesure du module est donc limitée à une profondeur Z telle que :

$$Z = \frac{R_c}{4 \cdot k_0 (\gamma - \alpha)}$$

Dans la pratique, par des moyens simples, on peut faire varier α de $1,05 \cdot 10^3$ dynes/cm³ (bentonite) à $1,5 \cdot 10^3$ dynes/cm³ (bentonite additionnée de baryte). La profondeur limite Z peut donc être considérable et il semble que, si l'on doit toujours prêter attention à ce phénomène, il ne paraît pas être généralement une limitation à l'essai.

Nous avons eu l'occasion de réaliser des essais dans une argile molle, de poids spécifique apparent égal à celui du fluide d'injection (soit $\gamma = 1,5 \cdot 10^3$ dynes/cm³). Les courbes ont la même allure que si les essais étaient réalisés dans des forages avec $\alpha = 1,05 \cdot 10^3$ dynes/cm³.

II.3 GONFLEMENT DU SOL ENTRE LE FORAGE ET LA REALISATION DE L'ESSAI

Lorsque les forages sont laissés libres pendant un certain temps, l'expansion des parois peut être importante. L'essai peut alors perdre toute signification ; il est représenté par une relation approximativement linéaire entre les volumes et les pressions, ce qui doit traduire un compactage progressif du sol sous l'action de la cellule de mesure.

Dans la pratique, on doit se méfier particulièrement de ce phénomène. Dans les argiles les plus molles, l'essai doit être réalisé immédiatement après forage (ne pratiquer le forage que par courtes passes ne dépassant pas un à deux mètres — voir plus loin). Dans les sols sableux, la tolérance est moins sévère. Nous avons obtenu des résultats très acceptables après un délai de vingt-quatre heures. Néanmoins, nous ne recommandons pas un repos de plus de quatre à cinq heures.

II.4 ESSAI A AXE VERTICAL

L'axe de la sonde étant habituellement vertical, le module pressiométrique mesure une certaine compressibilité horizontale du terrain. Cette compressibilité est-elle la même dans tous les sens, c'est-à-dire le sol est-il isotrope ? (Précisons bien que notre propos n'est pas d'examiner ce qui se passe sous une fondation mais de traiter de l'essai pressiométrique intrinsèquement.)

Dans des carrières de sables alluvionnaires (Pliocène) et dans des falaises des Limons des Plateaux, nous avons pratiqué des essais pressiométriques avec sondes verticales et horizontales.

Dans les Limons des Plateaux (un couple d'essais est représenté à la figure 9) nous n'avons pu mettre en évidence de différence significative. Dans le sable Pliocène les différences notées — faibles d'ailleurs — sont probablement le fait de l'hétérogénéité (fig. 10 et tableau récapitulatif I).

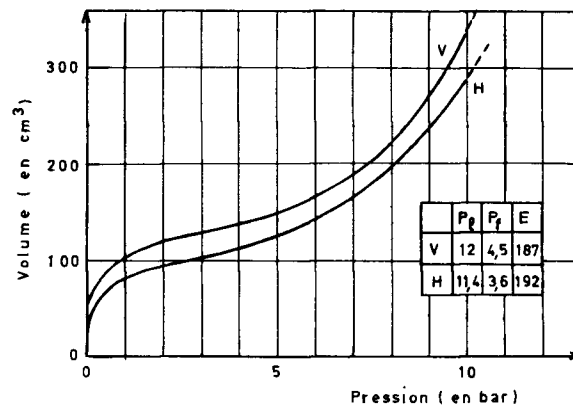


Fig. 9 - Essais horizontaux et verticaux - Falaises de Cesson, Limons des Plateaux.

V : Essai à axe vertical, à 1,40 m de profondeur.
H : Essai horizontal, à 1,40 m du bord de la falaise.

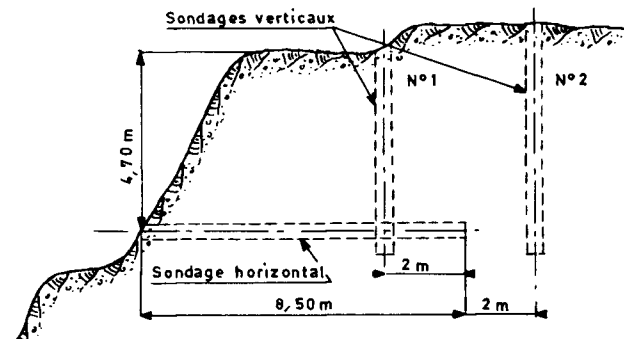


Fig. 10 - Essais horizontaux et verticaux. Sable Pliocène. Schéma d'implantation. Coupe. Carrière de la Heuzardières Rennes.

TABLEAU I

Sondage horizontal			Sondage 1 vertical			Sondage 2 vertical		
d (en m)	P_i	E	Z (en m)	P_i	E	Z	P_i	E
1	10	270	3	14,2	230	1	3,6	85
2	14,4	280	4	23,2	255	2	9,5	155
3	20,0	420	4,90	22,2	190	3	15,1	160
4	22,1	425	5,80	30	220	4	20,7	230
5	23,7	420				5	25	340
6	23,3	330				6	25	590
7	24,4	330						
8	21,5	260						

Les valeurs en gras sont celles qui peuvent être comparées (sondes approximativement en correspondance).

On doit cependant faire une remarque importante : l'essai pressiométrique ne permet pas de mesurer la véritable anisotropie éventuelle du sol. En effet, si une sonde placée verticalement exerce un champ sensiblement horizontal, une sonde placée horizontalement, exerce un champ dans toutes les directions du plan perpendiculaire à son axe et en partie dans la même direction horizontale que précédemment. Il est donc normal qu'un tel procédé ne conduise pas à des écarts de mesure pouvant représenter l'anisotropie du milieu.

Il est cependant probable que si ce phénomène était important (par exemple dans le rapport de 1 à 2), il aurait été mis en évidence par nos essais. Mais on ne généralisera pas ces conclusions à tous les dépôts. Un cas particulier est celui des roches présentant des alternances de couches dures et molles, comme par exemple certains schistes. Mais, on rejoint là un autre problème qui est celui de la longueur et de la déformabilité des cellules de mesure.

II.5 DEFORMABILITE DE LA CELLULE DE MESURE

Lorsque l'on réalise des essais pressiométriques, on se trouve placé — comme bien souvent — devant des nécessités contradictoires :

- bonne résistance des sondes afin d'éviter des éclatements intempestifs ;
- inertie minimale afin d'obtenir la meilleure sensibilité de mesure ;
- bonne rigidité d'ensemble de la sonde afin que celle-ci n'épouse pas les légères hétérogénéités ou variations géométriques du forage et que le champ exercé demeure cylindrique à symétrie verticale.

Une sonde pressiométrique n'est bien sûr ni infiniment souple ni infiniment rigide.

Dans les terrains meubles on peut la considérer comme rigide et l'essai pressiométrique intègre alors les micro-hétérogénéités du sol ; c'est un avantage.

Dans le cas de terrains présentant des alternances de couches dures et molles continues (ou à la limite lorsqu'une sonde est placée à la frontière de deux terrains de natures différentes), le problème est plus complexe.

Si les couches sont de natures très différentes, généralement les sondes éclatent car elles périssent par traction à la jonction de deux couches (c'est une faute opératoire de placer les sondes à cheval sur deux couches différentes lorsqu'il est possible de procéder autrement).

Si les couches sont de natures assez différentes, on enregistre généralement des courbes à deux ou plusieurs parties linéaires dans la phase pseudo-élastique. De telles courbes se rencontrent également lors d'essais réalisés dans des terrains présentant des blocs noyés dans une matrice de médiocre qualité. Les sondes peuvent alors être

considérées comme souples par rapport aux rigidités différentielles des matériaux.

Dans la première phase de l'essai (*fig. 11*), ce sont les matériaux les plus meubles qui réagissent et qui absorbent presque seuls les variations de volume de la sonde. Une fois une certaine pression atteinte, les zones plus dures réagissent à leur tour. Les modules ainsi mesurés n'ont alors qu'une valeur relative car, pour les calculer, on fait l'hypothèse d'une répartition uniforme le long de la sonde du volume d'eau injecté, ce qui n'est pas le cas.

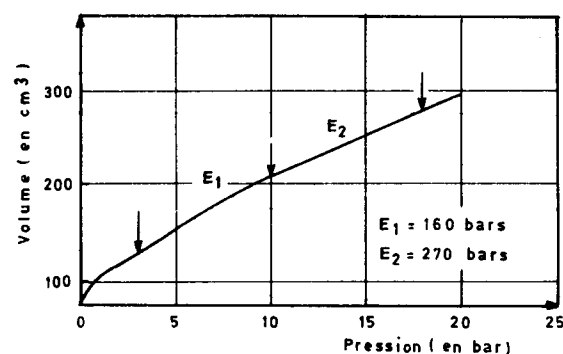


Fig. 11 - Phase pseudo-élastique à deux pentes. Schiste altéré (schistosité subverticale). Ville de Rennes Pont Bagout.

Dans des schistes on peut également rencontrer le phénomène inverse : la sonde pouvant être placée dans une zone dure, le début de l'essai peut indiquer la réaction de ce seul matériau (*fig. 12*). Il lui correspond un module E_1 . Puis, le volume de la sonde augmentant, les zones plus molles réagissent et donnent un module E_2 inférieur au premier.

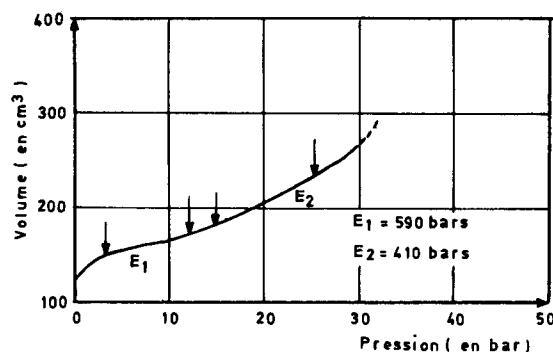


Fig. 12 - Phase pseudo-élastique à deux pentes. Schiste altéré. Ville de Brest. Forme de Radoub.

On peut obtenir un essai plus représentatif de la réaction globale du milieu en accroissant la rigidité de la sonde, ce qui se fait en l'introduisant dans un tube d'acier dilatable latéralement grâce à des fentes longitudinales. Ce tube est placé dans un forage de même dimension et non pas introduit à force. Cette méthode peut parfois présenter des inconvénients, comme dans les roches fissurées, par

exemple, car le contact entre le tube et le rocher n'est certainement pas intime.

II. 6 « PROFONDEUR CRITIQUE » DE L'ESSAI

Les essais pressiométriques réalisés trop près de la surface du sol conduisent à des résultats pessimistes qui ne traduisent pas le phénomène habituel de « rupture profonde ».

En deçà d'une certaine profondeur, l'essai est sans doute fortement influencé par la surface.

Nous avons groupé dans le *tableau II* les résultats de diverses mesures réalisées en surface dans un sable propre peu compact ($\gamma = 1,45 \cdot 10^3$ dynes/cm³), peu structuré et peu humide.

TABLEAU II

Profondeur (en m)	P _i bar	E bar	γ	W	φ	R _p bar	R _p /P _i	E/P _i
0,50	1,65	25	1,51	4 %	35°	20	12,1	15,2
0,75	1,87	22				22	11,8	11,8
1,00	2,10	21	1,47	4 %	34°5	20	9,5	10,0
1,25	1,97	22	1,55	5 %	37°	20	10,2	11,2
1,50	1,95	33	1,50	7 %	35°	22	11,3	16,9
1,75	2,20	35				25	11,4	15,9
2,00	3,90	40				26	6,65	10,3

R_p est la résistance en pointe au pénétromètre statique. Elle atteint presque immédiatement une valeur quasi-constante — à l'hétérogénéité près — alors que P_i augmente avec la profondeur. Au-delà de deux mètres, le rapport R_p/P_i est constant et de l'ordre de 6,8.

Notre pénétromètre était un appareil Gouda de 36 mm de diamètre. Dans le cas présent, la profondeur critique de l'essai pressiométrique était située vers 1,50 mètre.

Il semble que le module pressiométrique soit moins influencé que la pression limite par ce phénomène (rapports E/P_i plus forts en surface qu'au-delà de deux mètres où ils se stabilisent vers 8 à 9). Cela doit permettre de corriger dans une certaine mesure les pressions limites trop faibles de surface, ce qui est nécessaire puisque les formules d'exploitation des résultats ne semblent pas en avoir tenu compte.

Cela présente également une conséquence importante : les essais pressiométriques réalisés en contrôle de réception de fouilles pour fondation indiquent quasi-systématiquement des chutes de P_i qui peuvent atteindre 20 à 40 % par rapport aux essais antérieurs au déblaiement et cela sur une profondeur d'un à deux mètres. Il faut bien se garder de mettre cette chute de propriétés sur le seul compte d'un décompactage ou d'une altération due aux agents atmosphériques ou aux circulations en fond de fouille.

II.7 INFLUENCE DE LA CONTRAINTE MOYENNE

La pression limite est influencée par la contrainte moyenne.

En dessous de la profondeur critique notée plus haut, la pression limite augmente en général légèrement avec la profondeur (par exemple dans des sables à caractéristique de cisaillement constante avec cette profondeur). Ainsi, lorsque l'on réalise des déblais importants, on semble mettre en évidence de légères chutes de la pression limite (même en dessous de la profondeur critique).

Le fait de pratiquer un forage dans le sol conduit nécessairement à une chute de la contrainte moyenne au voisinage des parois. On peut donc dire que la mesure des caractéristiques pressiométriques intrinsèques du sol est impossible de façon opérationnelle mais il est probable que cette influence est négligeable.

III FACTEURS POUVANT AVOIR UNE INFLUENCE SUR LA MESURE DE LA PRESSION LIMITE

Dans ce qui précède, nous avons examiné l'influence des conditions générales de l'essai et de la technologie sur les résultats de la mesure.

Nous allons examiner ici l'influence de la réalisation de l'essai lui-même sur P_i puis au chapitre IV, l'influence sur le module.

III.1 FORME DE LA COURBE PRESSIOMETRIQUE

La forme de la courbe n'influe pas sur P_i mais sur l'évaluation qui peut en être faite.

Dans les cas les plus courants, la courbe présente une asymptote verticale nette dont l'abscisse est la pression limite cherchée. Dans le cas de matériaux lâches elle peut se présenter comme indiqué à la *figure 13*. Elle n'a pas d'asymptote. On a mis en évidence un phénomène de rupture progressive.

Par définition, on doit prendre comme pression limite la pression qui entraîne un accroissement de volume de la cavité double du volume initial.

Lorsque le diamètre du forage est trop grand — ce qui se traduit sur la courbe par des V₀ supérieurs à la normale, soit 100 à 150 cm³, la pression limite n'est pas atteinte pour les 700 cm³ disponibles au contrôleur pression-volume (*fig. 13a*). On peut alors pratiquer une réinjection : on isole le C.P.V. du reste de l'appareil et on introduit un nouveau volume d'eau. On peut ensuite reprendre l'essai. Nous ne sommes pas partisans de cette

méthode car, pour les essais suivants, il sera difficile de connaître la quantité exacte d'eau qui se trouve dans l'appareil sans ressortir la sonde du forage et sans faire un nouveau remplissage. Il nous paraît préférable de tracer la courbe pression corrigée dans la sonde (en logarithme) en fonction de $\log (\Delta V/V_0)$ où

V_0 est le volume total de la cavité P_0 et

ΔV la variation totale de ce volume entre P_0 et la pression P atteinte à chaque palier.

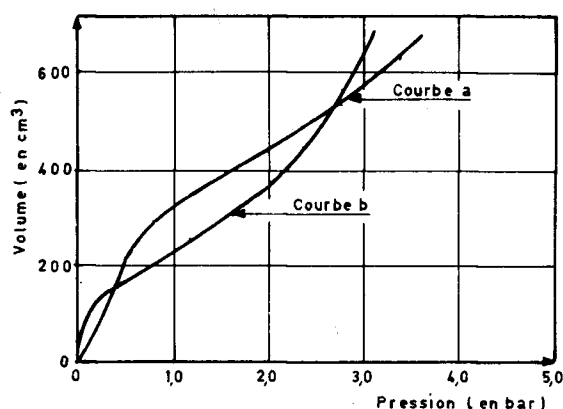


Fig. 13 - Sable lâche ($\gamma = 1,35$) saturé. (Marais de Dol).
courbe a : forage trop grand, 25 paliers de 2 minutes
 $p_1 = 4,9$ bars
courbe b : forage normal; essai normal : 12 paliers de deux minutes $p_1 = 3,3$ bars.

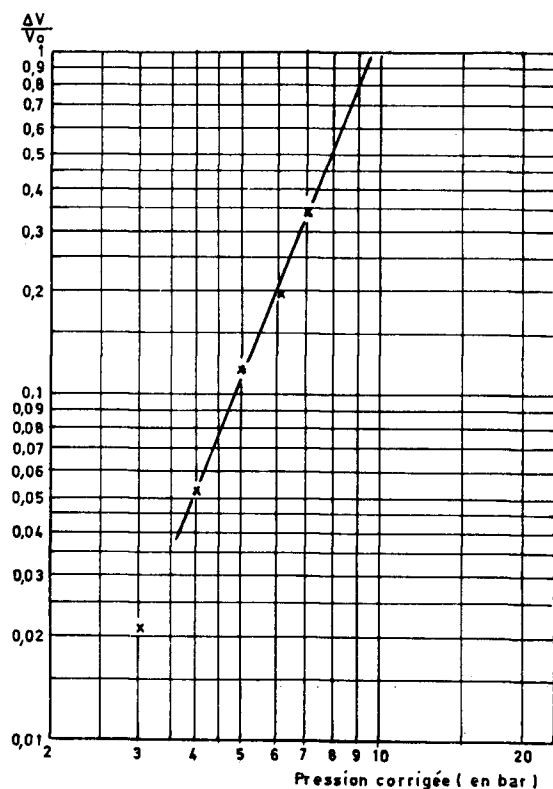


Fig. 14 - Argile raide. $8,4 < P_1 < 8,9$ bars (Loutehel).

Cette courbe est sensiblement une droite (fig. 14) au-delà d'une certaine pression. En prenant l'intersection de cette droite avec l'horizontale d'ordonnée $\frac{\Delta V}{V} = 1$, on obtient la pression limite correspondante.

Dans l'exemple cité, il s'agit d'une argile compacte. La pression limite est de 8,7 bars (pression contrôlée par d'autres méthodes de forage donnant des P_0 moindres) alors que la méthode de graphique habituelle aurait donné 6 bars environ. La courbe bilogarithmique donne :

$$8,4 < P_1 < 8,8 \text{ bar}$$

III.2 NOMBRE OU DUREE DES PALIERS

En règle générale, si on fait varier le nombre ou la durée des paliers dans une fourchette limitée par rapport à l'essai standard l'influence sur la valeur de la pression limite sera négligeable. Le cas des matériaux sableux, lâches saturés (ou des limons saturés) fait cependant exception, car les diminutions d'indice des vides en cours de phase plastique entraînent des pressions interstitielles qui font chuter la pression limite dans des proportions parfois importantes.

A la figure 13, on a représenté deux courbes d'essai dans un sable lâche ($\gamma = 1,35$) saturé. L'essai à quatre mètres comportait douze paliers de deux minutes. Celui à cinq mètres vingt-cinq paliers de deux minutes. La pression limite passe de 3,25 à 4,9 bars, alors qu'un essai de pénétration statique voisin, indique le même résultat à ces deux profondeurs (fig. 15). Il s'agit ici d'un cas extrême, généralement la différence semble être de l'ordre de 10 à 15 %.

Dans ces matériaux, il est donc indispensable de pratiquer quelques essais de longue durée au voisinage d'essais standards afin d'étudier ce problème séparément.

III. 3 REALISATION DU FORAGE

Généralement le type de forage — ou sa qualité — n'influent pas sur la mesure de la pression limite, à la condition cependant d'éviter les fautes opératoires graves telles que celles qui consistent à faire les essais dans des forages au trépan — sou-pape par exemple ou rotation avec injection dans les sols faiblement cohérents.

Dans certains terrains cependant, des méthodes donnant par ailleurs des résultats acceptables sont à proscrire absolument, car elles peuvent détruire la structure du matériau en profondeur. Tel est le cas du battage ou d'une rotation brutale dans les sols sableux lâches (surtout s'ils sont saturés) ou dans les sols à structure en nid d'abeilles. Seules la tarière à main à injection ou une rotation mécanique prudente (permettant un contrôle rigoureux de l'injection) pourront donner des résultats satisfaisants.

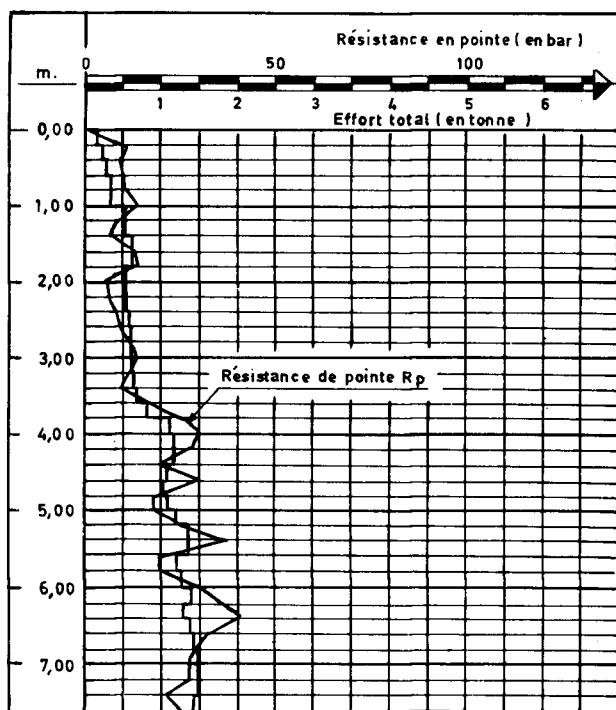


Fig. 15 - Essai au pénétromètre statique. Sable saturé (Marais de Dol, sondage n° 1).

Généralement une destruction de la structure se traduit par des courbes fantaisistes qui ne sauraient tromper l'expérimentateur tant soit peu averti. On note également des courbes quasi-linéaires (fig. 16) qui représentent probablement un compactage continu du sol sous l'influence de la sonde.

Dans les sables présentant des pressions limites supérieures à 10 bars environ, la pénétration rapide d'un outil de forage (battage ou mèches hélicoïdales) peut entraîner un compactage du terrain ce qui amène des augmentations de pression limite de l'ordre de 15 à 20 %. Nous reviendrons plus loin sur ce problème.

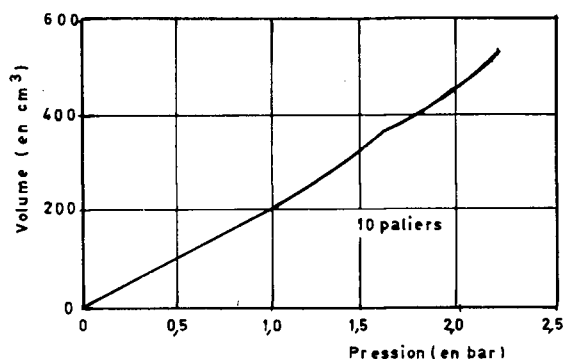


Fig. 16 - Battage au carottier Delmag. Sable lâche saturé (Marais de Dol).

IV FACTEURS POUVANT AVOIR UNE INFLUENCE SUR LA MESURE DU MODULE PRESSIOMETRIQUE

IV. 1 DIAMETRE DE FORAGE TROP GRAND

Le module est défini par une relation de la forme

$$E = k \cdot \frac{dp}{dv} \text{ où le coefficient } k \text{ est fonction du}$$

volume total du trou pour une pression correspondant à la pression moyenne de la phase pseudo-élastique. Lorsque le diamètre de forage est trop grand, le coefficient k en est modifié d'autant. Mais la répartition des contraintes étant modifiée du fait de la plus grande dimension de la sonde, on constate une chute concomitante du rapport dp/dv (relèvement de la courbe pressiométrique).

Le produit $k \cdot \frac{dp}{dv}$ en est-il affecté ?

Nous avons tenté une vérification expérimentale en exagérant le phénomène, c'est-à-dire en réalisant — dans un même forage pour un terrain à qualités relativement constantes avec la profondeur — alternativement des essais en $\varnothing 60$ et $\varnothing 44$ dans un sondage de diamètre nominal $\varnothing 60$. Les résultats sont indiqués au *tableau III*.

TABLEAU III

Forage A $\varnothing 60$			Forage B $\varnothing 60$			Comparaison $\varnothing 60$ $\varnothing 44$
Pro-fon-deur (en m)	\varnothing (en mm)	E (en bar)	Pro-fon-deur (en m)	\varnothing (en mm)	E (en bar)	
3	44	145	3	60	210	1,45
4	60	260	4	44	250	1,04
5	44	175				
6	60	310	6	44	255	1,22
7	44	220	7	60	300	1,36
8	60	340	8	44	270	1,26
9	44	240	9	60	310	1,29
10	60	280	10	44	260	1,08

Les forages particulièrement mal calibrés semblent donc entraîner dans ce terrain une chute de module de 20 à 30 %.

Lorsque V_0 n'excède pas 200 cm³ — ce qui devrait toujours être vérifié pour que le trou puisse être qualifié de correct — l'influence du calibrage est négligeable.

IV. 2 QUALITES DES PAROIS DU FORAGE

Contrairement à la pression limite, le module est assez sensible aux qualités des parois du forage.

Si la pression limite a été affectée par le sondage, il est évident qu'il en sera de même du module. La réciproque n'est pas vraie. Pour expliquer cela on peut avancer deux hypothèses :

- le terrain n'a été que légèrement remanié par le sondage et il lui correspond à P_1 un « remaniement » plus important ;
- la zone remaniée par le forage est de faible épaisseur. L'amortissement des contraintes est donc faible entre le premier « anneau » de terrain intact et la cellule de mesure. Les causes de perturbations des parois du forage sont multiples et elles peuvent provenir :
- du refoulement du sol sous l'action de l'outil de forage ou à l'introduction de la sonde ;
- d'une perturbation mécanique due à la rotation, au battage, aux vibrations ou aux allées et venues de l'outil de forage ;
- d'une humidification ou érosion dues à l'éventuel fluide d'injection ;
- d'éboulement des parois entraînant un décompactage.

Pratiquement, il ne nous paraît pas qu'il puisse exister dans l'état actuel du matériel, un outil idéal pour la mise en œuvre du pressiomètre. C'est à l'opérateur qu'il appartient, en fonction de son expérience générale et en fonction des premiers résultats enregistrés sur le chantier, d'adapter son matériel et sa technique au terrain à étudier.

Force nous est donc d'examiner séparément les cas les plus typiques que nous avons été amenés à étudier à ce jour.

IV.2.1 Argiles molles à moyennement compactes

Seule la tarière à main avec injection de bentonite, permet de mesurer des modules corrects mais à condition de respecter un mode opératoire strict.

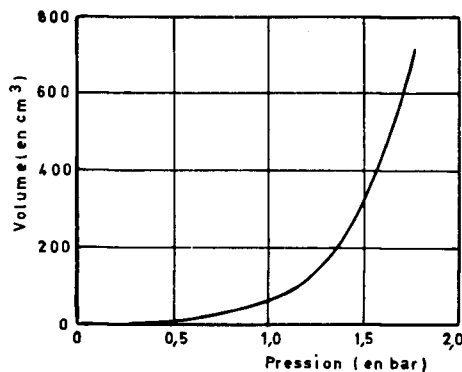


Fig. 17 - Fonçage de la sonde. Argile molle. Vallée de Trevello (I et V).

Dans les terrains les plus médiocres, la courbe extrême est obtenue par enfoncement manuel du pressiomètre (sans avant-trou) (fig. 17). On constate que la pression limite n'est pas affectée par cette opération. Par contre l'allure de la courbe, très éloignée de la courbe classique, est caractéristique d'un refoulement latéral du terrain. Une telle courbe est bien sûr inexploitable du point de vue module et il y aurait danger à en confondre la partie linéaire avec une phase pseudo-élastique. S'il n'y était pris garde, ce sont des courbes de ce genre que l'on obtiendrait même à l'aide de la tarière à main.

Les précautions nécessaires pour obtenir un essai convenable sont les suivantes :

- l'opérateur manœuvrant la tarière à main doit bien distinguer le mouvement de découpe du mouvement de poinçonnement ;
- l'outil doit être bien affûté. Si on utilise des sondes « E » — qui sont pleines — il nous paraît souhaitable que la cuillère ait un diamètre légèrement supérieur à celui de la sonde (\varnothing 64 mm pour une sonde de diamètre nominal \varnothing 60 nous paraît convenir le mieux). Si cette précaution n'est pas prise, l'introduction d'une sonde « E » dans le forage peut provoquer un effet piston qui surtout en partie basse du forage, du fait de la concentration des sédiments, peut refouler latéralement le terrain. Cet ennui est supprimé sur les sondes qui possèdent une âme creuse ;
- dans les sols les plus mous, une fois l'essai terminé en sonde « E », les membranes étant nécessairement de faible inertie et le terrain ne « revenant » pas immédiatement, la sonde ne se dégonfle pas complètement. Il reste parfois 200 à 300 cm³ d'eau dans la cellule de mesure. Cette eau doit être aspirée avant la descente — ou la remontée — de la sonde pour l'essai suivant, faute de quoi on provoquera un nouveau refoulement des parois. Dans les sols de meilleure qualité, une légère translation suffit à ramener le volume à zéro. Cet ennui est supprimé pour les sondes « G » où l'action des cellules de garde dégonfle automatiquement la cellule centrale ;
- dans les sols très mauvais la tarière à main peut avoir tendance à descendre de son propre poids. L'opérateur doit la soulager, faute de quoi le volume des déblais sera inférieur à celui du trou. De même il ne faut jamais appuyer exagérément sur l'outil ;
- il faut éviter de forer plusieurs mètres à la fois. Au-delà de deux à trois mètres, les tiges de tarière à main peuvent venir frotter contre les parois et les perturber. De la sorte on évite également de laisser s'écouler un temps trop long entre le forage et l'essai.

Les sondes à âme creuse permettent une technique très intéressante : on dispose la cuillère de tarière à main à l'avant de la sonde. L'injection de bentonite se fait à travers les tiges de tarière à main et à travers le corps de la sonde. On peut ainsi forer en continu, sans mouvement d'outil ou de

sonde dans le forage et en faisant les essais immédiatement. Une sujétion cependant :

- une rotation continue est impossible en raison de la présence des tubulures de Rilsan qui risquent de s'enrouler autour des tiges et de s'arracher. On doit donc forer par mouvement alternatif en avant et en arrière et non plus par rotation dans un seul sens. Nous ne pensons pas que ce procédé entraîne des perturbations spéciales. Une autre méthode consiste à monter la cuillère en bout de sonde sur un roulement avec cliquet. Le mouvement alterné en tête se traduit donc par une rotation continue de la cuillère.

C'est cependant cette technique que nous recommandons pour les essais dans les sols les plus mous.

IV.2.2 Argiles compactes à raides

On ne doit utiliser les moyens mécaniques que lorsque la tarière à main est devenue inopérante.

Les mèches hélicoïdales continues ne conviennent pas en général car, après une pénétration correcte sur quelques mètres, elles « bourrent » et refoulent le sol.

Le battage — tout au moins à l'aide de carottiers de médiocre indice de surface généralement utilisés (carottiers dits « type Delmag ») — semble le plus souvent remanier le forage en surface et entraîner une chute de modules qui peut être de l'ordre de 50 % (la pression limite étant le plus souvent inchangée dans les argiles compactes à raides).

Cette perturbation des parois est caractéristique du battage des carottiers Delmag et cela dans presque tous les terrains (y compris les sables compacts).

Elle résulte à notre avis de trois phénomènes :

- ces carottiers « bourrent » très rapidement. Au bout de quelques mètres de pénétration ils se comportent comme un tube plein et refoulent le terrain qui vient donc « serrer » fortement sur le tube ;
- la descente du tubage a dirigé les « lignes » de déformation du sol vers le bas. La remontée du tubage peut provoquer un retournement de ces lignes de déformation et cet effet est sans doute aussi nocif que le précédent (c'est un peu le même problème qui se pose en prélèvement d'échantillons où l'on doit impérativement extraire la carotte du carottier dans le même sens que son introduction) ;
- enfin le retrait du tube provoque un décompactage brutal du terrain.

La conjonction de ces trois phénomènes provoque quasi-systématiquement une chute des modules.

Dans les argiles compactes à raides, lorsque la tarière à main ne peut plus pénétrer, c'est la rotation mécanique avec injection de bentonite qui nous a semblé donner les meilleurs résultats et en particulier, l'utilisation de carottiers à câble. Ces derniers présentent l'avantage d'éviter le « ramonage » des parois puisque le tube extérieur reste en place

pendant toute la durée du forage. La remontée de ce tube en fin de forage est moins nocive qu'avec la Delmag car le sol a été découpé et ne « serre » donc pas sur le tube. D'autre part, le fluide d'injection forme lubrifiant entre ce tube et la paroi. Cet avantage se retrouve d'ailleurs pour tous types de carottiers simples ou doubles lorsque le pourcentage de carottage est nul : on ne remonte alors l'outil qu'en fin de forage.

A la figure 18 on a groupé les profils pressiométriques voisins réalisés dans une argile compacte. Un sondage a été réalisé à la Delmag (carottier battu), l'autre à la sondeuse XCH 60 (carottier à câble avec injection de bentonite). Les pressions limites sont sensiblement conservées. Par contre les modules à la Delmag ont chuté de près de 50 %.

IV.2.3 Limons ou sables lâches à moyennement compacts au-dessus de la nappe

La tarière à main doit être utilisée systématiquement. Si on a respecté certaines précautions élémentaires comme celles citées pour les argiles molles, les essais sont très généralement de bonne qualité. Bien que la tenue des parois soit souvent assurée par une légère cohésion, il nous paraît recommandable d'utiliser une injection de bentonite : on est alors plus assuré d'éviter un décompactage en profondeur et des éboulements localisés.

Dans certains sables, cependant, l'influence de la bentonite peut provoquer une chute du module. Nous avons noté une chute de 20 % environ dans un sable argileux non saturé.

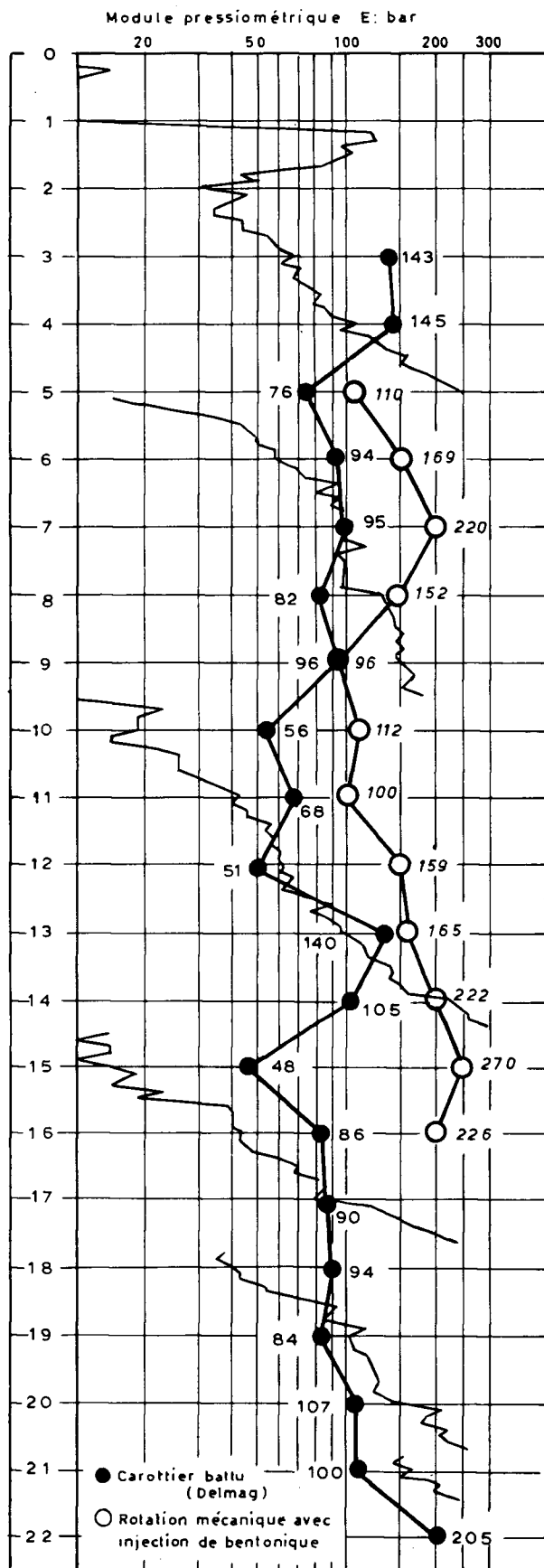
Ce phénomène semble pourtant assez rare.

Le battage, ou une rotation mécanique brutale (même avec injection) sont à déconseiller, car ils conduisent à des forages de trop forts diamètres dus à des éboulements incontrôlables.

Les sondages mécaniques avec injection d'eau sont à proscrire absolument, non seulement en raison des variations des propriétés mécaniques que l'eau peut provoquer mais plus encore en raison des phénomènes d'érosion des parois que ce fluide entraîne. Le sondeur n'est pas maître de ces problèmes et il se trouve alors dans l'incapacité de réaliser un trou de qualité constante de haut en bas. A l'exploitation des résultats on se trouve devant une dispersion importante et on ne sait plus si elle est inhérente au sol ou due à la non-constance des qualités du trou.

Si la tarière à main a des difficultés de pénétration et si on utilise le carottage, l'injection de bentonite est donc impérative.

Les mèches hélicoïdales continues présentent l'avantage de forer à sec. La qualité du trou est presque toujours bonne dans des sols moyennement compacts (« E » de l'ordre de 100 bars) à condition d'opérer une pénétration assez lente (et de toujours tourner en manœuvre descendante comme ascendante). Une avance trop rapide aurait



pour conséquence de refouler le terrain. Dans les sols plus médiocres, la stabilité de l'engin de sondage intervient grandement. L'utilisation de ce procédé par tarières légères (moto-tarières par exemple), ou de tarières Highway conduit à des modules trop faibles (trous trop grands, vibrations, forages non cylindriques...). Par contre, les mêmes mèches montées sur la sondeuse XCH 60 peuvent donner encore des résultats satisfaisants pour des terrains à modules inférieurs à 100 bars. Ces mèches hélicoïdales conduisent cependant à des résultats médiocres lorsque le sol contient des éléments blocaux (trou « arraché »).

Lorsque ces matériaux peu compacts contiennent de gros éléments, il est souvent nécessaire de battre le pressiomètre sans avant-trou. Nous revenons à ce problème au chapitre suivant.

IV.2.4 Limons ou sables lâches à moyennement compacts sous la nappe

Dans ce cas encore on doit tenter a priori systématiquement les forages à la tarière à main à injection en respectant toujours les mêmes précautions.

Si les matériaux ne présentent pas de gros éléments (graviers ou blocs) la tenue des parois est bonne et les résultats corrects.

Si les matériaux présentent de gros éléments, la bentonite ne suffit pas à les maintenir en général et deux possibilités se présentent alors :

- battre directement l'appareil (voir plus loin) ;
- utiliser les sondes creuses avec cuillère à l'avant. Au moment de la rédaction de cet article nous n'avons pas encore une grande expérience de ce procédé dans les sables grossiers.

Lorsque des sols sableux fins sont soumis à un gradient hydraulique (quelque soit l'origine du gradient), l'utilisation de la bentonite peut également ne pas suffire à la stabilité du sondage. L'utilisation du pressiomètre avec cuillère à l'avant, est alors impérative.

IV.2.5 Sables compacts

Ces terrains ne posent que peu de problèmes. Nous utilisons habituellement la rotation à sec aux mèches hélicoïdales (éviter comme toujours l'avance trop rapide), et le carottage à injection modérée de bentonite.

IV.2.6 Rocher

Le diamètre du forage doit être bien calibré, faute de quoi, en raison des hautes pressions pouvant être atteintes par certains appareils, les éclatements de sondes sont fréquents.

Fig. 18 - Module pressiométrique. Argile raide. (Loutehel sondage n° 2).

Lorsque le sondage est sujet à éboulements (rocher fissuré), on en est averti à l'examen de la courbe qui présente un V_0 important. Le champ exercé par l'appareil n'est sans doute plus exactement cylindrique mais nous ne pouvons assurer que le module s'en trouve affecté dans des proportions importantes.

V. INTRODUCTION A FORCE DU PRESSIOMETRE

Il arrive parfois que le fluide d'injection remplissant le forage ne suffise plus à en maintenir les parois.

Tel est le cas des sables avec graviers, galets, blocs et de remblais grossiers surtout lorsque ces matériaux sont placés sous la nappe. Il devient alors nécessaire de battre le pressiomètre sans avant-trou et à l'abri d'un tube lanterné (*voir paragraphe II.5*).

On pratique alors deux types d'essais à la fois :

- un essai de pénétration dynamique qui est le seul que l'on puisse faire par ailleurs dans la plupart de ces matériaux,
- des essais pressiométriques tous les mètres mais après refoulement latéral du terrain.

Quelle peut être l'influence de ce refoulement sur les valeurs pressiométriques. C'est un problème difficile car les comparaisons entre le pressiomètre « foré » et le pressiomètre battu ne sont pas possibles, puisque le premier ne peut être réalisé dans les terrains où l'on pratique généralement le second.

C'est donc dans les sols sableux que nous avons dû procéder à ces comparaisons. On se méfiera des extrapolations trop hâtives aux terrains graveleux qui — dans l'état actuel des choses — doivent demeurer le seul domaine d'emploi du tube fendu utilisé classiquement.

Le tube fendu le plus utilisé a un diamètre de 60 mm. La sonde placée à l'intérieur est une sonde de 44. Les coefficients k sont inchangés car on fait l'hypothèse fondamentale que le tube fait partie intégrante du sol (c'est-à-dire que l'essai est équivalent à un essai en $\varnothing 44$ dans un forage de même diamètre). S'il n'en était pas ainsi on devrait augmenter k afin de tenir compte de la variation de volume de l'ensemble sur toute la longueur de la sonde de 44 (ou alors procéder avec des sondes de longueur égale à celle des sondes de 60 soit 21 cm).

Nous avons tenté une vérification expérimentale de l'hypothèse précédente en comparant les résultats d'essais de deux forages voisins : l'un à la tarière à main en $\varnothing 44$, l'autre après introduction sans battage du tube fendu de 60 dans un forage à la

tarière à main de même diamètre. Les modules sont comparables entre eux quoiqu'un peu plus faibles au tube fendu (10 à 20 %). Ce phénomène viendra par la suite tempérer l'influence du battage. Ceci peut s'expliquer en partie : en cours d'essai les lames s'écartent et le vide qui les sépare s'agrandissant, il est possible que les éléments les plus fins du sol y pénètrent compensant ainsi partiellement l'incompressibilité propre des lames (c'est parfois une gêne car, en fin d'essai, elles ne reprennent pas toujours leur position initiale au diamètre 60).

La technologie du tube fendu conduit à une autre sujétion. En cours de battage, la sonde est placée à l'intérieur du tube. Si elle était fixée rigidement dans le tube en partie haute et en partie basse, elle ne pourrait s'expanser lors de l'essai car cette expansion serait alors contrariée par les lames elles-mêmes nécessairement fixées à leurs deux extrémités à la pointe et au tube supérieur. La sonde ne peut donc être fixée qu'à une extrémité (haute pour le type « E » et basse pour le « G »), l'autre liaison étant souple (amortisseurs de caoutchouc ou de bois par exemple). De ce fait, la percussion (ou la vibration, ou l'effort de fonçage) est transmise à la pointe par l'intermédiaire de ces lames. Ces lames ploient sous chaque percussion. Si le sol n'oppose qu'une faible butée au déplacement des lames, il subit donc des mouvements alternatifs de compression et de décompression qui, s'ils ne sont pas toujours nécessairement nocifs, n'en sont pas moins perturbateurs et en tous les cas incontrôlables.

Nous préférons quant à nous, battre le tube fendu à l'aide d'un mandrin intérieur reposant sur la pointe (tube fendu et tube extérieur 63/49 et mandrin constitué par le tubage de 44). Une fois la cote atteinte, le mandrin est remonté et la sonde descendue à la cote voulue.

Cette méthode présente l'inconvénient de nécessiter plusieurs manœuvres, de diminuer légèrement la puissance de pénétration (puisque la masse frappée est augmentée alors que l'énergie de battage est constante). En revanche, l'essai est plus satisfaisant, en cas de crevaison en cours d'essai on ne remonte que la sonde (le tube reste en place), on peut également pratiquer des essais différés sans immobiliser de sonde.

Comme la sonde n'est fixée qu'à une seule extrémité, lors du gonflage, les lames s'écartent, la pointe du tube remonte légèrement. Cette remontée est faible et d'ailleurs variable le long de la sonde et nulle au point supérieur. Néanmoins ce mouvement entraîne peut-être en cours d'essai des cisaillements parasites dans des plans verticaux. Cette influence est sans doute faible mais elle méritait d'être notée.

L'influence du battage (y compris du battage des carottiers type Delmag) est diverse suivant la nature des sols et en particulier suivant leur structure.

Nous avons cru remarquer en général des réactions

très différentes suivant que les terrains sont lâches (et surtout s'ils sont en même temps saturés) ou compacts. On peut, pour fixer les idées, proposer une frontière à l'utilisation du battage direct, vers les dix bars de pression limite.

V.1. SABLES ET GRAVIERS LACHES SATURES

L'introduction par battage du tube fendu provoque généralement une chute importante des propriétés mécaniques. Les courbes ont souvent l'allure fantaisiste illustrée par la *figure 16* et sont donc en général inexploitable. Il est fréquent que les pressions limites notées sur les courbes aient chuté de plus de moitié : il est probable que sous l'influence de chocs répétés et violents (entraînant autant de mouvements transversaux des lames), la structure ait été entièrement détruite.

Il est possible que la vibration, ou mieux le vérinage, provoque un remaniement moindre mais nous n'en avons pas grande expérience.

Lorsque les conditions de chantier peuvent s'y prêter, nous réalisons des essais différés : on ne pratique l'essai que quelques heures ou quelques jours après battage. Généralement, on constate que l'on obtient des courbes ayant des allures plus régulières et des augmentations du module et de la pression limite dues probablement à une restructuration du terrain autour du tube.

Ce type de terrains n'en constitue pas moins — à notre avis — le domaine d'utilisation le plus délicat du pressiomètre.

V.2 SABLES ET GRAVIERS COMPACTS

L'introduction à force de l'appareil provoque évidemment une modification de l'état du sol en place, donc les résultats de l'essai s'en trouvent affectés.

Pour chiffrer cette modification nous avons — dans les terrains où cela était possible (sables) — comparé les résultats obtenus :

- à la tarière à main sans injection,
- au lanterne battu directement (sans carottier en avant du tube et essais mètre par mètre en descendant),
- au battage du carottier Delmag,
- à la vibration de ce même carottier à l'aide d'un marteau Cobra.

Certains expérimentateurs recommandent de prolonger le tube fendu par un carottier type « Delmag » (voir *paragraphe IV.2.*). Nous ne croyons pas pour les sols de notre zone d'action, à l'efficacité d'une telle méthode, car après une faible pénétration, les carottiers sont pleins et le phénomène nous paraît équivalent à celui du battage direct.

En cas de présence de très gros éléments, ce carottier peut cependant permettre un meilleur guidage du tube en brisant certains blocs au passage. Inversement, on peut aussi de la sorte entraîner un tel bloc sur plusieurs mètres, ce qui a un effet nocif sur la qualité de l'essai.

Ces résultats appellent de nombreuses remarques (pour ce terrain on a considéré que les essais éta-



Forage à la tarière Highway équipée en mèches hélicoïdales. Forage incliné à 45° pour essais dans un schiste.



Battage du tube carottier à l'aide du mouton Delmag de 100 kg.

lons étaient obtenus dans des forages réalisés à la tarière à main sans injection de bentonite, les forages étant effectués mètre par mètre et les essais immédiatement après) :

- Les écarts sont de l'ordre de 20 à 30 % pour la pression limite et de 30 à 40 % pour les modules entre les valeurs extrêmes.
- En surface, les modules au tube fendu sont trop faibles, et les pressions limites trop fortes. Le phénomène est inversé en profondeur.

Si on trace les rapports E/P_1 , on constate donc que, alors qu'ils sont relativement constants et voisins de 18 pour la tarière à main, ils augmentent régulièrement de 10 à 22 au tube fendu (fig. 19).

La donnée la plus importante du tableau IV est la variation de V_0 en fonction de la profondeur (V_0 étant le volume d'eau se trouvant dans la sonde lorsque seule la pression hydrostatique agit sur elle). Le « trou » est de dimension croissante avec la profondeur. Nous ne pensons pas que ceci puisse être mis sur le compte de la pression hydrostatique mais plus sur le mouvement des lames noté précédemment.

En partie haute du sondage, la pression naturelle des terres étant faible et les vibrations du tube importantes, une partie du terrain refoulé par les lames revient vers elles et se trouve dans un état lâche : modules faibles. La zone nécessairement compactée par l'introduction d'un corps étranger se trouve donc au-delà : P_1 plus forts que ceux notés à la tarière à main.

En partie basse, la pression naturelle étant plus

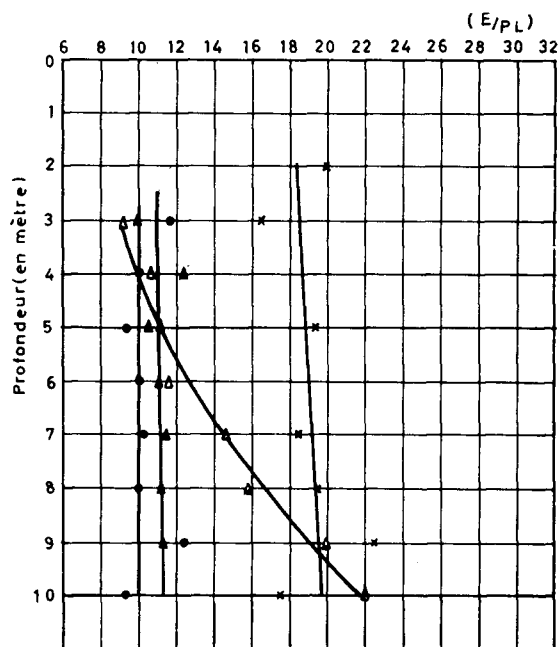


Fig. 19 - Variation de E/P_1 en fonction de la profondeur pour diverses méthodes de mise en œuvre du pressiomètre.

TABLEAU IV

Nous relatons ici l'exemple le plus typique car il a été réalisé dans le terrain le moins hétérogène que nous ayons rencontré : il s'agit d'un sable Pliocène ($IP = 12$) non saturé ($S_r \sim 40 \%$) (Commune de Saint-Malo-de-Phily - Ile-et-Vilaine).

Pro- fon- deur en m	Tarière à main		Carottier battu		Lanterné battu		Cobra		V ₀	E ₄ /E ₁	E ₂ /E ₂	E ₃ /E ₁	E ₂ /E ₃	P ₁₂ / P ₁₁	P ₁₃ / P ₁₁	P ₁₂ / P ₁₃	P ₁₄ / P ₁₁
	E ₁	P ₁₁	E ₂	P ₁₂	E ₃	P ₁₃	E ₄	P ₁₄									
2	390	18,8	430	25	250	25			33		1,10	0,64	1,72				
3	195	12,1	200	16,8	135	15,4	170	15,3	70	0,87	1,02	0,69	1,48	1,39	1,28	1,09	1,26
4	230	13,2	160	15,9	145	15,0	185	14,3	108	0,81	0,70	0,63	1,10	1,20	1,14	1,06	0,98
5	260	13,3	155	16,5	180	16,1	235	16,9	133	0,90	0,60	0,69	0,86	1,24	1,21	1,02	1,27
6	220	15,6	185	18,1	200	17,2	230	15,5	156	1,04	0,84	0,91	0,92	1,16	1,10	1,05	0,99
7	310	15,6	160	15,7	280	19,3	220	16,1	167	0,71	0,52	0,90	0,57	1,01	1,24	0,82	1,03
8	310	16,0	170	17,3	280	17,4	220	16,9	187	0,71	0,55	0,90	0,61	1,08	1,09	0,99	1,06
9	350	15,5	210	16,9	330	16,5	280	17,8	247	0,80	0,60	0,92	0,64	1,09	1,07	1,02	1,15
10	310	17,9	190	20,5	405	18,4	290	19,9	258	0,94	0,61	1,30	0,47	1,15	1,02	1,12	0,82

forte, le mouvement des lames est moindre et la zone compactée est voisine du tube : E plus forts qu'à la tarière à main et P_l identiques.

C'est à ce critère de V_0 que l'on pourrait dans une certaine mesure, contrôler l'essai :

Lorsque les V_0 sont importants et que la courbe part linéairement de ce point, il est probable que les modules seront exagérés et les pressions limites correctes.

Lorsque les V_0 sont faibles et que la courbe présente au départ une certaine courbure, il est pro-

bable que les modules seront faibles et les pressions limites exagérées (fig. 20).

Lorsque l'on réalise des essais différés dans de tels matériaux, on constate donc soit une augmentation du module dans le premier cas (reconstitution du terrain autour de la sonde), soit une diminution due probablement à une relaxation des contraintes. Cette diminution est toutefois un fait plus rare et moins sensible que les augmentations.

Si on revient au tableau précédent, on constate que les résultats au batteur Delmag sont assez éloignés de ceux à la tarière à main et plus proches de ceux enregistrés au tube fendu.

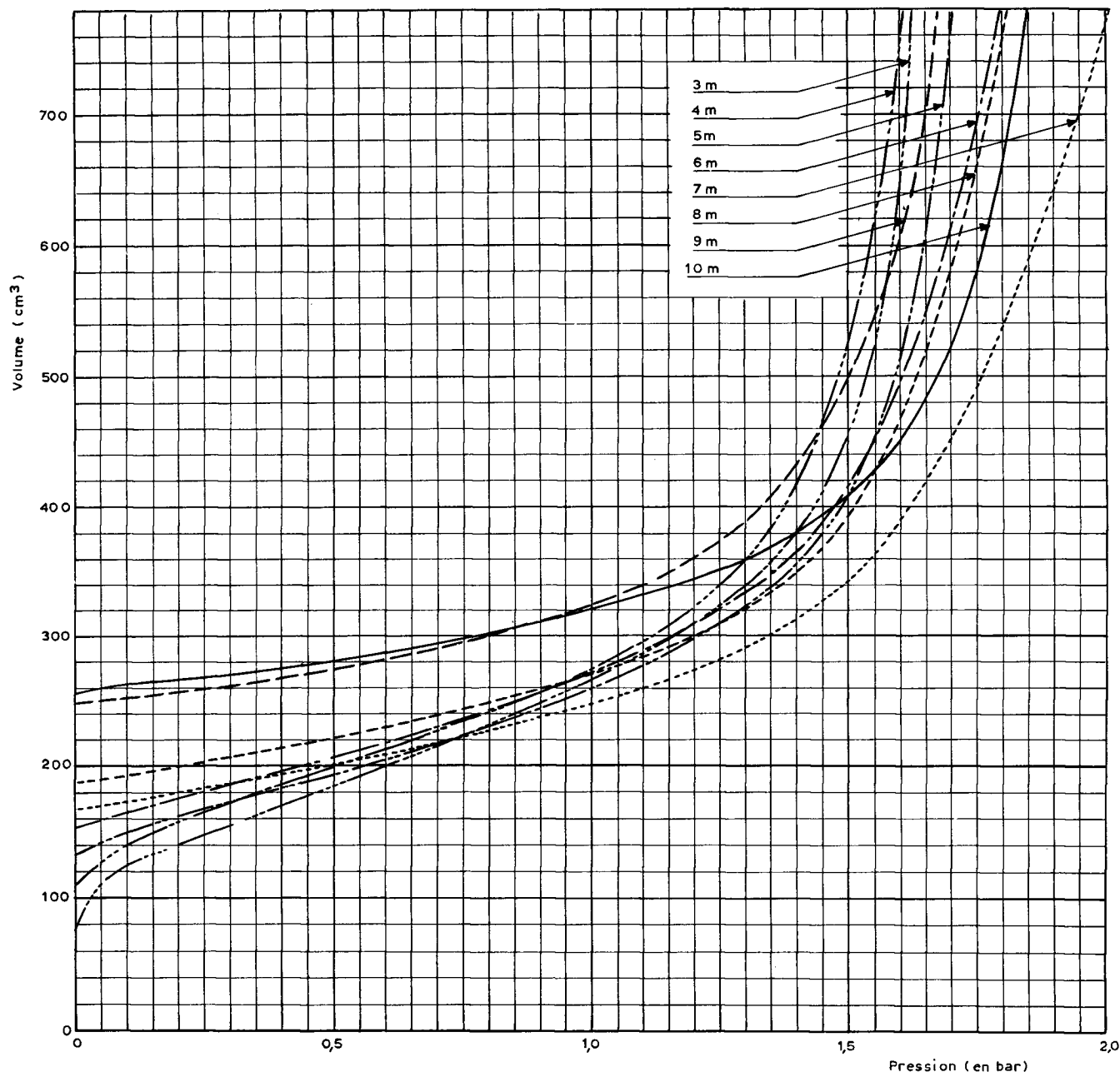


Fig. 20 - Courbes pressiométriques obtenues pour diverses profondeurs après battage sans avant-trou.

VI. REMARQUES

Quelques techniques particulières peuvent être utilisées et spécialement celle du réalésage : on fore rapidement en diamètre 44 et on reprend ensuite le forage à la tarière à main en diamètre 60. Cette méthode donne toute satisfaction dans le cas de sables moyennement compacts à compacts.

Il est recommandé également, dans certains cas, d'utiliser des tubes télescopiques : par exemple mèches hélicoïdales creuses, puis forage en 60 à travers le train de mèche, puis éventuellement en 44 à travers le train de tiges de 60. Les carottes obstruant les tubes peuvent être extraites par utilisation de sondeuses légères type Packsack par exemple (après avoir relevé légèrement le tube à débourrer).

VII. QUELQUES COURBES CARACTERISTIQUES

Dans un but récapitulatif, nous avons indiqué à la *figure 21* quelques courbes caractéristiques. Ces courbes ne traduisent que des cas extrêmes et on peut rencontrer tous les cas intermédiaires.

Il appartient cependant à l'utilisateur du pressiomètre d'avoir présents à l'esprit ces divers schémas afin de pouvoir — dans chaque cas — juger de la validité de son essai et de la nature du phénomène qu'il a provoqué dans le terrain. Eventuellement il sera amené à pratiquer dans un même site plusieurs types d'essais lorsque cela sera possible (avec ou sans tube fendu, en faisant varier le nombre ou la durée des paliers...).

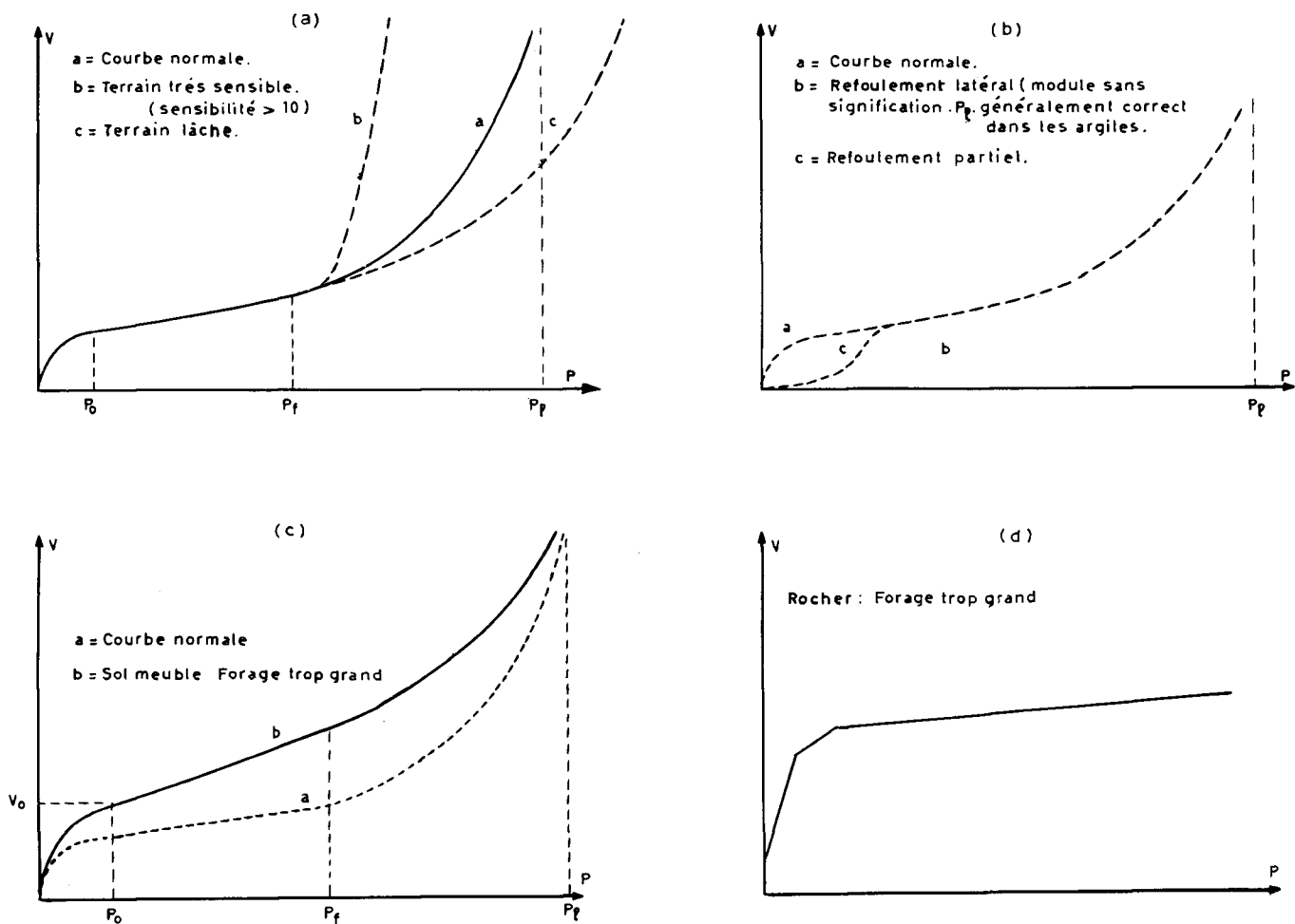
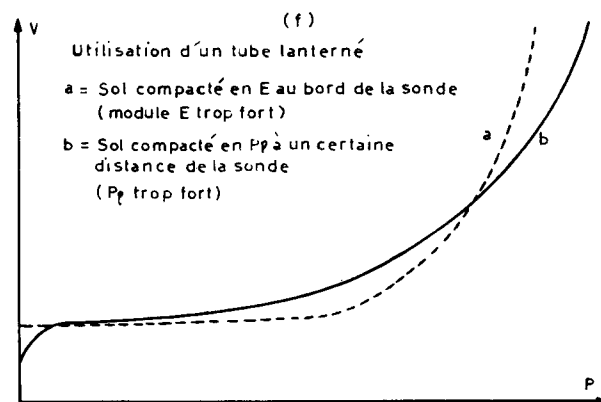
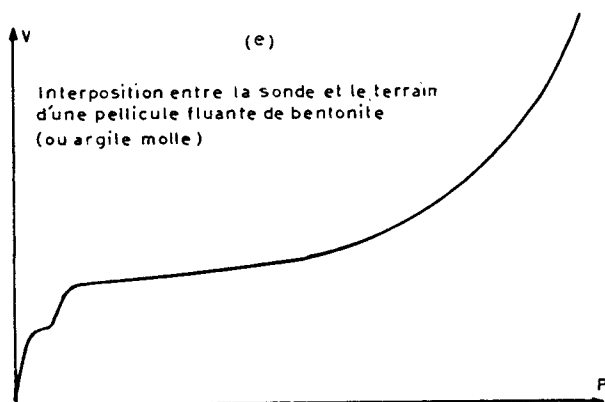


Fig. 21 - Quelques courbes typiques (voir aussi au verso).



Quelques courbes typiques.

CONCLUSIONS

Nous venons d'examiner quelques problèmes posés par l'influence de la technologie des sondes, de la réalisation du forage et de l'essai sur les valeurs pressiométriques considérées intrinsèquement.

Les pourcentages, cités dans cet article, concernant l'influence de tel ou tel paramètre sur les caractéristiques pressiométriques, ne peuvent être pris que comme des ordres de grandeur. Le but de l'article n'était pas de résoudre définitivement le problème de la mise en œuvre mais simplement de mettre en lumière certains pièges en les assortissant d'un facteur quantitatif.

La réalisation et l'exploitation d'un essai pressiométrique est un travail délicat qui ne peut être négligé. Ceci nécessite une très bonne pratique de l'appareil, une bonne connaissance des techniques de forage et des sols. L'opérateur réalisant l'essai ne peut donc être laissé à l'abandon sur le chantier. L'Ingénieur responsable de l'étude doit suivre pas à pas le déroulement des opérations afin — éventuellement — de modifier radicalement le mode opératoire.

Les règles d'or à respecter sont claires :

- réaliser systématiquement des forages à la tarière à main. Ne procéder d'une autre manière que lorsque cette méthode est devenue inopérante.
- proscrire absolument les méthodes de forage qui pourraient conduire à des résultats dispersés (en particulier l'injection d'eau ou le battage de carottiers dans les terrains éboulés).
- substituer souvent la notion de qualité à celle de rentabilité.

Si ces saines précautions sont prises, l'essai pressiométrique sera réalisable dans presque tous les terrains avec une précision et une fidélité compatibles avec les impératifs des constructions courantes. Réalisé sans discernement, l'essai pourrait par contre conduire à des résultats aberrants n'allant pas toujours dans le sens de la sécurité.

Il n'en demeure pas moins que la mise en œuvre « idéale » du pressiomètre reste à trouver. Les sondes creuses munies d'un outil foreur avec retour des sédiments par l'intérieur semblent être le domaine de recherche le plus prometteur.